

ПОЛУЧЕНИЕ КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ ХЛАДАГЕНТОВ R404A И R407C НА ТЕХНИЧЕСКИ ГЛАДКИХ ТЕПЛООТДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Е. Н. Волкова

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь

Научный руководитель А. В. Овсянник

Цель работы: разработка критериальных уравнений для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании озонобезопасных хладагентов на гладких поверхностях в условиях большого объема на основе результатов экспериментального исследования процесса теплообмена.

При анализе условий теплообмена при развитом пузырьковом кипении жидкостей на теплоотдающей поверхности процесс теплоотдачи можно рассматривать как теплоотдачу в условиях естественной конвекции.

Механизм процесса теплообмена между обогреваемой поверхностью и жидкостью представляется периодически протекающими с определенной амплитудой и частотой элементарными процессами. Вызываемые ими сильные колебания температуры соприкасающихся слоев жидкости приводят к существенной неравномерности полей температур в каждой точке поверхности. Сложность и особенность процесса пузырькового кипения на поверхности заключается в его двойственности – периодичности и нестационарности его в отдельных точках поверхности и стационарности процесса в целом (при постоянной плотности теплового потока). Особенность теплообмена при кипении в условиях большого объема состоит также в том, что перемещение жидкости является результатом самого процесса, и скорость движения жидкости не может быть задана заранее. Вид основных критериев (чисел по-

добия) определяется из известной системы дифференциальных уравнений, описывающий нестационарный конвективный теплообмен, в которую входят: уравнение неразрывности, уравнение движения жидкости, уравнение энергии, уравнение теплообмена на границе «теплоотдающая поверхность–жидкость».

Числа подобия, которые установлены из системы указанных уравнений:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda};$$

$$\text{Pe} = \frac{wl}{a};$$

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{l^2};$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a};$$

$$\text{Gr} = \frac{gl^3\beta\Delta T}{\nu^2};$$

$$\text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho w^2}.$$

Не все числа подобия в данном случае являются определяющими. Можно не рассматривать критерий Эйлера (так как величина Δp не может быть задана заранее) и критерий Грасгофа (так как влияние сил тяжести, связанных с температурным расширением жидкости, пренебрежимо мало по сравнению с силами инерции и вязкости). Следовательно, остаются три определяющих критерия подобия: Пекле, Фурье и Прандтля. Число Нуссельта является определяемым числом подобия.

Для конкретизации поставленной задачи (описание теплоотдачи при кипении) необходимо в систему уравнений включить условия, отражающие специфику данного вида теплообмена. Процесс кипения определяется следующими условиями и соответствующими им заранее заданными величинами: физическими свойствами жидкости и ее пара, зависящими от рода жидкости и давления, и, в общем случае, свойствами поверхности нагрева. Кроме того, необходимо задать температуру стенки $T_{\text{ст}}$, т. е. температурный напор ΔT (условие первого рода), либо плотность теплового потока на стенке q (условия второго рода). Оба способа по существу равнозначны, но от выбора задания (ΔT или q) будет зависеть форма и комбинация определяющих чисел. Наиболее часто для практических расчетов и обобщения экспериментальных данных используется второй способ – задание тепловой нагрузки поверхности нагрева.

При такой постановке задачи изначально заданными можно считать плотность теплового потока q , а также физические свойства жидкости (при заданном давлении насыщения). В этом случае отношение $q/r\rho_{\text{п}}$ имеет размерность скорости и имеет строго заданное значение, в отличие от скорости движения жидкости, которая представляет собой довольно сложную функцию этого отношения и других величин. Ве-

личина $q/r\rho_{\text{п}}$ является специфическим параметром для теплообмена при кипении, поэтому ее необходимо включать в условия однозначности.

Одним из основных вопросов, возникающих при определении критериев подобия, является вопрос о выборе характерного линейного размера. Таким размером не может быть линейный размер поверхности нагрева, поскольку обычно рассматривается задача кипения на поверхности больших размеров, значительно превышающей размер паровых пузырей. Отсутствие существенного влияния высоты слоя жидкости на интенсивность теплообмена при кипении также доказана в ряде экспериментальных работ. Критический радиус зародыша $R_{\text{кр}}$ зависит от температурного напора (или от плотности теплового потока) и тоже, следовательно, не может быть принят как характерный линейный размер.

В общем случае, анализ системы уравнений процесса теплообмена при кипении в большом объеме приводит к связям между обобщенными переменными. С. С. Кутателадзе и соавторы предложили следующее критериальное уравнение для обобщения опытных данных:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Ar}, K_t, K_p). \quad (1)$$

Из приведенных переменных величин, стоящих под знаком функции, необходимо выделить те, которые в большей степени влияют на процесс теплоотдачи в исследованных условиях, и исключить из числа аргументов те переменные, которые незначительно влияют на теплоотдачу при кипении. Кроме того, из числа аргументов исключаются величины, которые являются постоянными в исследованных условиях.

Установлено, что на интенсивность теплоотдачи наибольшее влияние оказывают плотность теплового потока q и давление (температура) насыщения p . Влияние величин q и p определяется числом Рейнольдса кипения Re и числом K_p . При реализации условий беспрепятственного отвода паровой фазы из области кипения теплоотдача при пузырьковом кипении не зависит от формы и ориентации теплоотдающей поверхности, поэтому ускорение сил поля тяжести не оказывает заметного влияния на теплоотдачу и число Архимеда кипения можно исключить из числа аргументов. Следовательно, критериальные зависимости, описывающие теплоотдачу при кипении фреонов R407c и R404a на гладкой технически шероховатой поверхности, могут быть записаны в виде:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, K_p). \quad (2)$$

Уравнение для определения коэффициента теплоотдачи в критериальном виде тогда запишется:

$$\text{Nu} = c \cdot \text{Re}^n \cdot K_p^k \cdot \text{Pr}^l. \quad (3)$$

$$\text{Здесь } \text{Nu} = \frac{\alpha l_*}{\lambda_{\text{ж}}}; \quad \text{Re} = \frac{q}{r\rho_{\text{п}}a} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}}; \quad K_p = \frac{p_{\text{н}}}{\sqrt{\sigma g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}}.$$

Теплофизические свойства жидкости и пара принимаются при температуре насыщения и представлены в таблице.

Теплофизические свойства хладагентов R407c и R404a

№ п/п	Теплофизические свойства	R407c	R404a
1	Плотность жидкости, кг/м ³	1138	1048
2	Плотность насыщенных паров, кг/ м ³	43,8	18,04
3	Удельная теплоемкость жидкости, кДж/кг · К	1,533	1,502
4	Удельная теплоемкость паров, кДж/кг · К	1,107	0,871
5	Коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/м · К	0,085	0,0746
6	Коэффициент теплопроводности паров, Вт/м · К	0,0154	0,012
7	Поверхностное натяжение, Н/м	0,06352	0,05413
8	Удельная теплота парообразования, кДж/кг	191,1	198,7

В результате обобщения опытных данных на основе представлений С. С. Кутателадзе было получено критериальное уравнение вида:

$$\text{R407c: } Nu = 10,7 \cdot Re^{0,57} \cdot K_p^{0,11} \cdot Pr^{-0,2}, \quad (4)$$

$$\text{R404a: } Nu = 10,6 \cdot Re^{0,52} \cdot K_p^{0,13} \cdot Pr^{-0,1}. \quad (5)$$

Заключение

Таким образом, на основе представлений С. С. Кутателадзе получены критериальные уравнения, позволяющие рассчитать интенсивность теплоотдачи при кипении фреонов R407c и R404a в условиях большого объема. Экспериментальные данные удовлетворительно описываются полученными критериальными уравнениями с погрешностью $\pm 25\%$ и эти зависимости могут быть рекомендованы для инженерных расчетов интенсивности теплоотдачи при кипении R407c и R404a в условиях большого объема на гладких технически шероховатых поверхностях.